

认知无线网络中基于微观经济学的动态频谱管理算法

黎文边 林粤伟 王小猛 冯志勇 张平

(北京邮电大学泛网无线通信教育部重点实验室 北京 100876)

摘要: 该文提出了认知网络中基于微观经济学的动态频谱管理机制, 实现异构无线网络中频谱资源的动态分配, 从而最大化频谱资源的利用率并提高运营商的收益。文中引入了频谱资源的经济价值因素以保证运营商间频谱交易的合理性。此外, 为了保证系统的性能, 文中提出了一种基于地理信息系统的空分模型, 并设计了干扰抑制技术以限制动态频谱管理带来的干扰。博弈论是一种能够有效解决自主分布式无线资源优化的算法, 该文将其引入, 为不同运营商提供双赢的频谱交易策略。仿真结果表明, 该频谱管理机制提高了频谱利用率以及运营商的收益, 并有效地抑制了系统间的干扰。

关键词: 认知无线网络; 动态频谱管理; 博弈论; 微观经济学; 系统间干扰; 重配置

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)04-0897-06

A Microeconomics Based Dynamic Spectrum Management Algorithm for Cognitive Wireless Networks

Le Van-bien Lin Yue-wei Wang Xiao-meng Feng Zhi-yong Zhang-Ping

(Key Lab of Universal Wireless Communications (Beijing University of Posts and Telecommunications),
Ministry of Education, Beijing 100876, China)

Abstract: This paper investigates a Microeconomics Based Dynamic Spectrum Management (MB-DSM) scheme to enhance the spectrum utilization and maximize the profit of operators for cognitive heterogeneous networks. The economic factor of the spectrum is considered in order to guarantee the rationality for the spectrum trading. Especially, a space division model is proposed based on Geographical Information System (GIS) to handle the interference issue among wireless systems. As a potential tool for promoting distributed autonomous radio resource optimization algorithms, game theory is applied to investigate a win-win solution for spectrum trading. The simulation results reveal that MB-DSM scheme not only improves the spectrum utilization and the operator's profit, but also mitigates effectively the interference between wireless networks.

Key words: Cognitive wireless networks; Dynamic spectrum management; Game theory; Microeconomics; Inter-system interference; Reconfiguration

1 引言

无线新技术的飞速发展形成了多种异构无线接入技术(Radio Access Technology, RAT)共存的无线通信网络格局。与此同时, 无线业务的迅速增长及其高速化和宽带化的需求使得无线频谱资源的匮乏问题显得十分严重。然而, 通信系统目前应用的是固定频谱管理方法(Fixed Spectrum Management, FSM), 导致频谱利用率低, 形成很多“频谱空洞”, 无法满足未来无线通信对频谱管理的需求。

随着端到端重配置^[1]概念的出现, 动态频谱管理(Dynamic Spectrum Management, DSM)被认为是一种有效提高频谱资源利用效率的途径, 已经成为通信领域的研究热

点。欧盟的端到端重配置(E²R)^[1], 端到端效能(E3)^[2]等项目已经将 DSM 作为其研究的核心内容之一。目前, DSM 研究已经有了初步的研究成果, DSM 的概念及其相对于 FSM 的效率增益已经得到了分析和验证^[3], 一些简单 DSM 方法已经被设计出来^[4-7]。然而, 这些机制并没有考虑到网络之间的竞争与合作关系, 尤其是在多运营商的场景中, 该问题显得十分突出。此外, 在这些机制中, 系统间的干扰问题并没有得到很好的解决。

本文基于认知无线网络的架构, 提出基于市场竞争与合作规律的动态频谱管理方法。该机制充分利用了异构网络间在不同的时间和空间维度上对频谱需求的差异, 以提高频谱资源利用效率。文中将微观经济学中的博弈论引入算法中, 深入研究基于讨价还价博弈模型的异构无线网络分布式频谱管理算法。仿真结果表明, 该机制提高了频谱利用率和运营商的收益, 并有效抑制了动态频谱交易带来的干扰。

2007-12-10 收到, 2008-05-19 改回

欧盟第七框架项目(FP7-ICT-2007-216248), 国家自然科学基金重点项目(60632030)和国家 863 计划重点项目(2006AA01Z276)资助课题

2 MB-DSM 模型

MB-DSM 体系结构如图 1 所示, 其中多种异构网络共存, 如 GSM, UMTS, DVB 等。为了支持动态频谱管理, 文中设计了一些新的功能模块。此外, 本文提出了一种空分模型以支持 MB-DSM 机制。

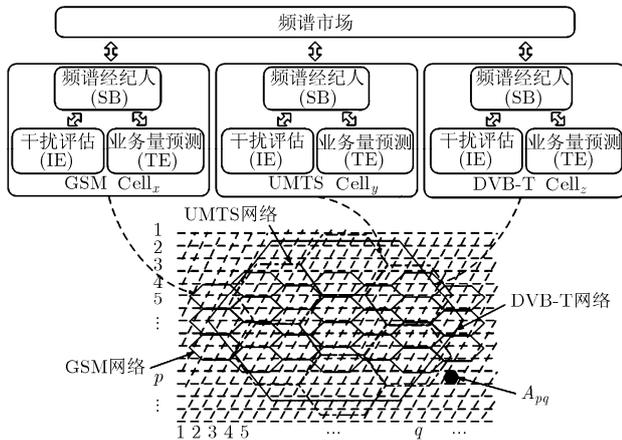


图 1 MB-DSM 体系框架

频谱市场是一个逻辑的频谱池, 其概念来源于实际的市场, 在频谱市场中各网络可以完成频谱交易。有空闲频谱的 RAT 小区可以将空闲频谱出租, 进而得到了频谱利用率以及收益的增益。相反, 缺乏频谱资源的 RAT 小区可以租借频谱资源来为其用户提供服务, 进而提高了收益。频谱市场中包含租借频谱的 RAT 作为租借方, 出租频谱的 RAT 作为出租方, 以及频谱作为交易的物品。

各 RAT 小区的频谱需求都随着负载的变化而变化。文中为每一个 RAT 小区设计一个负载预测(Traffic Estimator, TE)模块来负责业务量的预测。负载预测有多种方法, 如基于历史值预测算法、基于当前值的预测算法、 n 个采样点的线性回归预测算法等^[3]。

动态频谱管理会给无线网络带来额外的系统间干扰^[7]。每一个 RAT 小区都有一个干扰评估(Interference Estimator, IE)模块负责系统间干扰计算, 并根据网络关于干扰设置的准则确定出租频谱方和租借频谱方之间是否满足干扰性能指标。

本文还设计了一个频谱经纪人(Spectrum Broker, SB)以完成频谱交易的决策, 并通过与对等的 SB 协商进行交易。基于 Mitola^[8]对于认知网络的定义, 所有的认知网络都具备感知环境的能力, 能够观察频谱环境。因此, SB 能获取频谱环境的相关信息。基于所获得的信息, SB 做出相关决策, 如需要租借或出租多少频谱、从何方租借或向何方出租频谱、出租或租借频谱的价格等。

MB-DSM 引入了一种新颖的空分模型, 将无线网络覆盖的区域分割成若干个的正方形区域, 称为单位区域(Area

Unit, AU), 即 $A_{pq}(p, q \in N^2)$ 。RAT 小区可以通过 A_{pq} 来进行定义, 即某小区 $= \{A_{pq}: (p, q \in N^2)\}$, 其中 A_{pq} 是被该小区覆盖的单位区域。空分模型的引入能够处理频谱交易带来的干扰问题。

MB-DSM 机制通过周期性的频谱交易进行频谱资源的优化利用^[3]。假设周期为 T , 则频谱交易的时间集合为 $\tau = \{\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n, \tau_{n+1} \dots\}$, 其中 τ_k 和 τ_{k+1} 的间隔是 T 。如果租借方在 (τ_{k+1}, τ_{k+2}) 时间周期租借了频谱, 则它只能在 (τ_{k+1}, τ_{k+2}) 时间周期内使用该频谱。在该周期结束的时刻, 需要将该频谱归还给出租方。

3 动态频谱管理的系统间干扰抑制

3.1 系统间干扰

本文提出了基于空分模型的干扰分析方法如图 2 所示, 不失一般性, 假设 RAT_i 为被干扰小区, 而 RAT_j 则是干扰小区。首先, 需要计算 RAT_j 对 RAT_i 在各单位区域造成的干扰, 以此为基础计算 RAT_j 对 RAT_i 的总干扰程度。

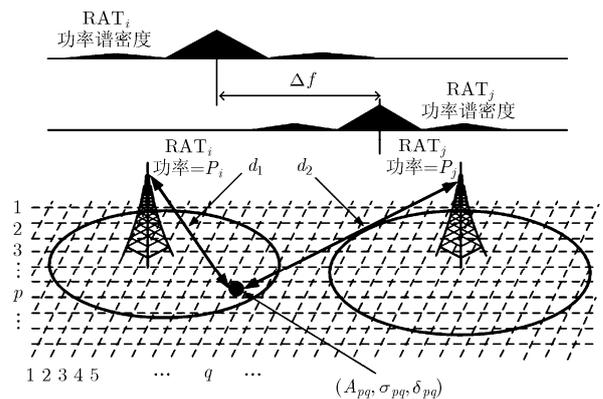


图 2 系统间干扰

(1)单位区域干扰概率 假设载波和干扰均是时变的信号, 其强度是统计独立并且服从正态分布^[9]。假设接收机在 A_{pq} 位置, 其接收的载波 $H_{c,pq}$ 和干扰 $H_{l,pq}$ 的强度均值分别为 $\hat{H}_{c,pq}$ 和 $\hat{H}_{l,pq}$, 则 $\hat{H}_{c,pq}$ 和 $\hat{H}_{l,pq}$ 取决于基站的发射功率以及从基站到接收机的距离。此外, $\hat{H}_{l,pq}$ 是干扰信号落到接收载波的频率范围的功率, 因此 $\hat{H}_{l,pq}$ 还取决于两个信道的频率间隔 Δf 。载波和干扰信号的方差与接收机位置的地形环境有关。假设在 A_{pq} 中, 所有的位置具有同样的地形环境, 因此载波和干扰在该 A_{pq} 中具有相同的方差 σ_{pq} 。

基于以上分析, A_{pq} 中载波 $H_{c,pq}$ 和干扰 $H_{l,pq}$ 的联合概率分布 F_{pq} 服从如下的双维正态分布^[9] :

$$F_{pq} = \left(\frac{1}{2\pi\sigma_{pq}^2} \right) \cdot e^{-\frac{1(H_{l,pq} - \hat{H}_{l,pq})^2}{2\sigma_{pq}^2}} \cdot e^{-\frac{1(H_{c,pq} - \hat{H}_{c,pq})^2}{2\sigma_{pq}^2}} \quad (1)$$

A_{pq} 的干扰概率是指载干比 C/I 低于一定的门限值 $(C/I)_{\min}$ 的概率, 该门限值是为了保证系统工作的质量而设定的。基于以上分析, A_{pq} 的干扰概率 P_{pq} 取决于载波和干扰

的均值 $\widehat{H}_{C,pq}$ 和 $\widehat{H}_{1,pq}$, 门限值 $(C/I)_{\min}$, 以及该 AU 的方差 σ_{pq} 。

$$P_{pq} = \left(\frac{1}{2\pi\sigma_{pq}^2} \right) \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{1}{2} \frac{(H_{1,pq} - \widehat{H}_{1,pq})^2}{\sigma_{pq}^2}} \cdot \int_{-\infty}^{(H_{1,pq} + (C/I)_{\min})} e^{-\frac{1}{2} \frac{(H_{C,pq} - \widehat{H}_{C,pq})^2}{\sigma_{pq}^2}} dH_{C,pq} dH_{1,pq} \quad (2)$$

进行变量的变换, 可以将式(2)变成如下的单重积分^[9]:

$$P_{pq} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{-\widehat{H}_{C,pq} + \widehat{H}_{1,pq} + (C/I)_{\min}}{\sqrt{2\sigma_{pq}^2}}} e^{-\frac{H_T^2}{2}} dH_T \quad (3)$$

(2)小区的干扰 在实际无线网络中, 用户在小区中的分布并不均匀, 定义 δ_{pq} 为 A_{pq} 的用户密度, 并假设 IE 通过认知功能可以学习到用户密度信息。小区的干扰取决于小区中各 A_{pq} 的干扰概率和用户的分布情况。

$$P_{\text{Cell}} = \sum_{p,q: A_{pq} \in \text{Cell}} P_{pq} \delta_{pq} \quad (4)$$

MB-DSM 机制中, 我们设计了一个小区干扰门限值 P_{Thres} , 如果小区的干扰不超过该门限值则干扰可以容忍, 因此干扰的可容忍条件为下式:

$$P_{\text{Cell}} \leq P_{\text{Thres}} \quad (5)$$

载干比的门限值 $(C/I)_{\min}$ 取决于该 RAT 本身对载干比的要求, 而小区干扰门限值 P_{Thres} 则是运营商根据其网络服务质量的要求而设定的。此外, 如果两个系统有多个信道时, IE 计算两个小区中每两个信道间的干扰, 并要求每一对信道的干扰都要低于小区干扰门限值 P_{Thres} 。

3.2 MB-DSM 干扰抑制

租借方只有在干扰不影响双方网络的服务质量时才能租借到频谱。为了满足干扰要求, 出租方的某些小区需要释放被出租的频谱。如图 3 中, 为了出租频谱给 RAT_j 的 Cell_x , 某些小区 ($\text{Cell}_x: k=6, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 16, 17$) 要释放频谱。每一个 IE 都要计算小区干扰, 并与 P_{Thres} 比较, 若不满足干扰可容忍条件, 则释放频谱。因此, 频谱交易是一个租借方 RAT 小区和一个出租方 RAT 小区集合之间的交易。只要该集合中有一个小区由于业务量较高而不能释放频谱, 那么出租方就无法出租该频谱给该租借方。

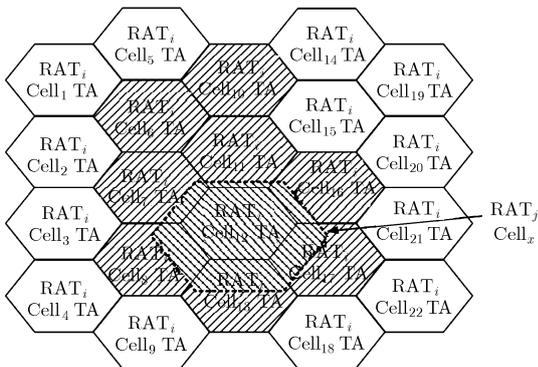


图 3 MB-DSM 干扰抑制

租借方 SB 的交易请求中需要设置其基站的预期最大发射功率、租借的频谱、基站的地理位置等信息以帮助出租方 IE 评估干扰条件, 并最终确定是否能交易。若 P_{Thres} 过高, 出租方需要释放频谱的小区较多, 导致频谱利用率下降。相反, 干扰要求宽松, 频谱利用率获得提升, 但其干扰性能随之下降。

4 频谱交易机制

4.1 动态频谱博弈模型

MBDSM 机制中, 我们将频谱交易看作是完全信息的动态博弈, 并引用微观经济学著名的 R-S 博弈理论(Rubinstein-Stahl)^[10] 来解决此动态博弈问题。假设租借频谱 SB 向出租频谱的 SB 租借 $S(\text{Hz})$ 的频谱, 租借方 SB 可以使用此频谱来为其用户提供服务, 并获取收益 P 。由于频谱是从出租方租借的, 收益 P 应该分成给出租方。应用 R-S 理论的频谱交易模型如图 4 所示。

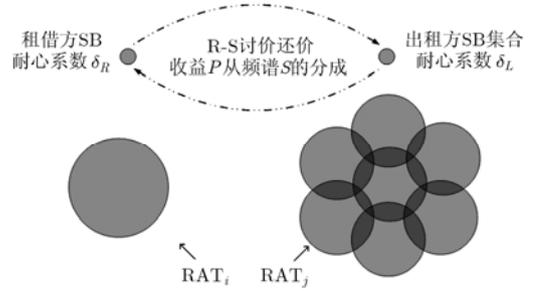


图 4 MB-DSM 交易模型

将收益 P 看成一个“蛋糕”, 双方基于该蛋糕的分成讨价还价。假设 X 为讨价还价结果的集合则:

$$X = \{(x_R, x_L) \in R^2: x_R \geq 0, x_L \geq 0 \text{ and } x_R + x_L = 1\} \quad (6)$$

其中 x_R 和 x_L 分别为租借方和出租方的分成。

R-S 博弈理论中, 双方进行无限次的讨价还价, 其讨价还价过程如下。在第一轮, 租借方提出一个分成提议 (x_R^1, x_L^1) , 若出租方接受该提议则博弈过程结束, 否则进入第二轮博弈。在第二轮, 出租方提出另外一个提议 (x_R^2, x_L^2) , 若租借方同意则博弈过程结束, 否则继续下一轮。博弈以双方轮流出价方式进行, 直到有一方接受对方的提议。R-S 博弈模型假设双方均有有限耐心, 并以 δ_R 和 δ_L 为租借方和出租方耐心系数。若某一方耐心系数高, 则说明其越有耐心, 博弈中将会得到较大的分成。

4.2 耐心系数

基于以上的分析, 耐心系数影响博弈结果, 而其耐心取决于频谱对博弈方的价值。因此, 为了求解博弈的结果, 首先需要估算不同博弈方的频谱经济价值, 并基于频谱价值计算其耐心系数。

(1)频谱经济价值估算 每一个频谱交易周期之前, 频谱经纪人将估算频谱经济价值, 并决定其耐心系数。假设 RAT

小区的总频谱为 B , 则带宽为 S 的频谱的价值估算为

$$V^S = \frac{L\alpha}{B}S \quad (7)$$

其中 L 是从 TE 获得的预测业务量, α 为单位业务量的收益。

(2) 租借方的耐心系数 对于频谱租借方, 频谱价值代表其对频谱需求的程度。若其价值较高则租借方可以通过使用租借的频谱来为用户提供更多的服务, 并获得更多的收益。这表明该租借方渴望得到频谱, 同时, 在博弈中, 耐心比较低。可以看出, 租借方的耐心系数是频谱经济价值的递减函数。此外, 在 R-S 博弈模型中, 耐心系数取值从 0 到 1^[10]。将耐心系数看作频谱价值的函数, 租借方耐心系数函数必需满足如下的条件:

$$\frac{d\delta_R(V_{\text{Rent}}^S)}{dV_{\text{Rent}}^S} < 0, \delta_R(0) = 1, \delta_R(\infty) = 0 \quad (8)$$

其中 V_{Rent}^S 是该 $S(\text{Hz})$ 频谱对租借方的经济价值估算。

理论上, 任何满足以上条件的函数均能当作租借频谱耐心系数函数。本文采用如下函数^[11]作为租借方的耐心系数的计算方法:

$$\delta_R(x) = 1 - \frac{e^{\lambda x} - e^{-\lambda x}}{e^{\lambda x} + e^{-\lambda x}} \quad (9)$$

其中 x 为租借方的频谱经济价值, λ 是租借因子。

(3) 出租方的耐心系数 对于出租方, 若频谱经济价值越高, 则很显然出租方希望得到越多的利益, 因此耐心越高。因此, 出租频谱耐心系数是频谱经济价值的递增函数。此外, 在 R-S 博弈模型中, 耐心系数取值范围从 0 到 1^[10]。若将出租方的耐心系数看作频谱经济价值的函数, 该耐心系数函数必需满足如下的条件:

$$\frac{d\delta_L(V_{\text{Lease}}^S)}{dV_{\text{Lease}}^S} > 0, \delta_L(0) = 0, \delta_L(\infty) = 1 \quad (10)$$

其中 V_{Lease}^S 是该 $S(\text{Hz})$ 频谱对出租方的经济价值估算。

此外, 在租借方包含多个 RAT 小区时, 由于不同 RAT 小区有不同的频谱的经济价值, 因此出租方的频谱经济价值 V_{Lease}^S 是所有 RAT 小区的总和。

任何函数满足以上条件均可以是出租方耐心系数函数。

本文采用如下函数^[11]作为租借方耐心系数:

$$\delta_L(x) = \frac{e^{\mu x} - e^{-\mu x}}{e^{\mu x} + e^{-\mu x}} \quad (11)$$

其中 x 为出租方的频谱经济价值, μ 是出租因子。

4.3 动态频谱管理的收益分配

频谱交易中, 频谱租借方和频谱出租方针对收益的分配进行博弈。根据 R-S 博弈理论, 博弈存在唯一纳什均衡^[10], 该纳什均衡是博弈的收益分配结果, 其结果表达式如下:

$$(x_R^*, x_L^*) = \left(\frac{1 - \delta_L}{1 - \delta_R \delta_L}, \frac{\delta_R(1 - \delta_L)}{1 - \delta_R \delta_L} \right) \quad (12)$$

此外, 由于该博弈是基于完全信息的动态博弈, 因此实际的 DSM 模型中, 为了最小化信令开销以及网络的处理工作量, 实际上该博弈过程并不需要 SB 通过发送信令协商,

而是直接计算出纳什均衡结果。收益分配在每一个 DSM 周期结束后进行结算。同时, 租借方需要将所租借的频谱归还给出租方。

5 仿真与评估

5.1 仿真配置

仿真场景包括 4 个异构网络, 其中, 两个 GSM 网络均有 14 个小区, UMTS 有 14 个小区, DVB-T 网络仅有一个小区。GSM, UMTS, DVB-T 总频谱带宽分别为 7, 15 和 24(MHz)。此外, 空分模型中, 我们设置每一个 A_{pq} 的面积为 2500m^2 , A_{pq} 的用户密度 δ_{pq} 是随机产生的, 而方差 σ_{pq} 则是随机选择 4 和 6^[9]。仿真的时间为一天, 一个频谱管理周期 T 是半个小时。其它仿真参数如表 1 所示。

表1 仿真参数

参数	GSM ₁	GSM ₂	UMTS	DVB-T
发射功率(dBm)	43	43	43	60
小区半径 r (m)	577	577	577	1750
信道带宽 B (MHz)	0.2	0.2	5	8
单位业务量收益 α	2	2	3	1
载干比门限 $(C/I)_{\text{min}}$	15	15	-7	12
小区干扰门限 P_{Thres}	0.05	0.05	0.1	0.1
租借因子 λ			1	
出租因子 μ			5	
噪声系数(dB)			4	
天线增益(dB)			4	

本仿真分别采用了 3GPP 05.05^[12], 3GPP 25.104^[13], 以及 ETSI EN300^[14]为 GSM, UMTS 以及 DVB-T 的频谱发射模板。此外, 为了计算干扰性能, 本仿真采用了 3GPP 25.942^[15]建议的损耗模型:

$$\text{Los(dB)} = 15.3 + 36.7\lg(d(\text{m})) \quad (13)$$

业务量预测采用了基于两个样本的线性回归预测结合历史值预测的技术^[3]。根据测量结果, GSM 和 UMTS 业务量白天较高, 晚上较低, 而 DVB-T 则是晚上较高, 白天较低。DVB-T 和 UMTS/GSM 业务量的特征具有很好的互补特性, 能充分利用时间维度上业务量的差异来提高频谱利用率以及网络收益。

5.2 结果与评估

首先, 我们分析 GSM₁, GSM₂, UMTS 和 DVB-T 网络的收益, 仿真结果如图 5-图 8 所示。图中可以看出, DSM 提高了运营商的收益。具体分析, 与 FSM 机制相比, GSM₁, GSM₂, UMTS 和 DVB-T 网络的收益分别平均提高了 11%, 10%, 8%, 5%。在业务高峰时, 网络的收益分别提高了 30%, 30%, 25%, 42%。

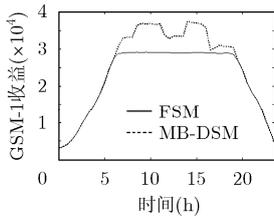


图 5 GSM₁ 网络收益

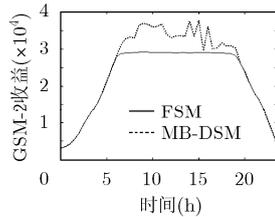


图 6 GSM₂ 网络收益

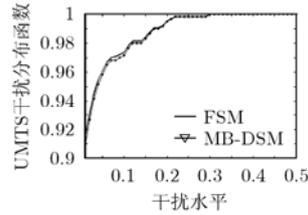


图 11 UMTS 干扰分布

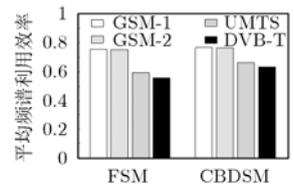


图 12 频谱利用效率

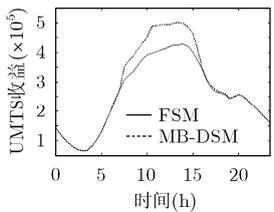


图 7 UMTS 网络收益

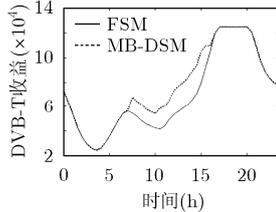


图 8 DVB-T 网络收益

其次, 我们验证 MB-DSM 机制的另一个重要性能指标, 干扰性能。通过计算网络在每一个 A_{pq} 的干扰 P_{pq} 的概率分布来说明其干扰性能。GSM₁, GSM₂, UMTS 的干扰分布如图 9-图 11 所描述。

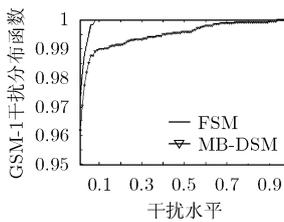


图 9 GSM₁ 干扰分布

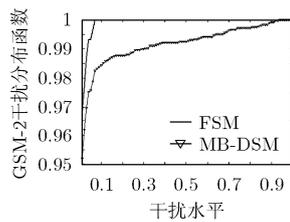


图 10 GSM₂ 干扰分布

对于 MB-DSM 机制, 96.2% GSM₁ 的 A_{pq} 以及 95.4% GSM₂ 的 A_{pq} 具有 P_{pq} 低于 0.01, 而在 FSM 则分别为 97.4% 和 96.8%。这一结果表明, MB-DSM 分别给 GSM₁ 和 GSM₂ 的干扰分布函数带来了 1.2% 和 1.4% 的干扰增量。一般而言, MB-DSM 的干扰分布函数比 FSM 稍高, 但其增量低于 1.2% 和 1.4%。对于 UMTS 网络, 使用 FSM 和 MB-DSM 的干扰概率分布曲线几乎相同, 与 FSM 相比, MB-DSM 的干扰概率分布稍微高一些, 其最大的增量是 0.6%。此外, 由于 DVB-T 只有一个小区, 一旦将频谱出租给任意租借方, 该小区需要释放该频谱, 因此 MB-DSM 不会给 DVB-T 网络带来干扰的增加。因此可以看出, MB-DSM 只带来了轻微的干扰, 并不会影响网络服务质量。

最后, 我们探讨各网络的平均频谱利用效率, 其结果如图 12 所示。首先定义 RAT 小区频谱利用效率为该小区所使用的频谱量与该小区总频谱量的比例。这里所谓的“网络平均频谱利用效率”有双重含义, 其一是时间上的平均, 即所仿真时间(一天)的频谱利用率在 48 个频谱管理周期的平均, 其二是一个同构网络中所有小区的频谱利用效率的平均。换言之, 网络的平均频谱利用效率是一个同构网络中属

于该网络的所有小区在所仿真时间中频谱利用效率的平均。从图中明显看出 MB-DSM 提高了频谱利用率, 尤其是 DVB-T 网络。与实际业务量相同, 我们将 GSM₁ 和 GSM₂ 业务量设定较高, 而 DVB-T 业务量较低, 因此 GSM 网络频谱利用率增益较低, 而 DVB-T 频谱利用率获得了很大的提高。

6 结束语

本文设计了 MB-DSM 的体系结构、功能模块以及实现的算法和机制。MB-DSM 算法引入网络频谱的经济价值以保证频谱交易的合理性, 并基于微观经济学中的 R-S 博弈理论提出了双赢的频谱交易算法。此外, 本文基于一种新颖的空分模型理念, 设计了 MB-DSM 的干扰抑制方法, 从而保证各无线网络的干扰性能。仿真结果表明, 该 MB-DSM 机制提高了频谱利用率以及运营商的收益, 并有效地抑制了系统间的干扰。

参考文献

- [1] End-to-End Reconfigurability. Workpackages. <http://e2r2.motlabs.com/workpackages>. Sept. 2007.
- [2] End-to-end Efficiency. Project Overview. <https://www.ict-e3.eu/project/overview/overview.html>. Jan. 2008.
- [3] Leaves P, et al. Dynamic spectrum allocation in hybrid networks with imperfect load prediction [C]. 3G Mobile Communication Technologies. May 2002: 444-448.
- [4] Chung Yao-liang and Tsai Zsehong. Modeling and analysis of dynamic spectrum allocation of two wireless communication systems [C]. International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC). Helsinki, Finland. Sept. 2006: 1-5.
- [5] Atakan B and Akan O B. Biologically-inspired spectrum sharing in cognitive radio networks [C]. Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). Hong Kong, China. Mar. 2007: 43-48.
- [6] Thilakawardana D and Moessner K. Cell-by-cell dynamic spectrum allocation in multi-radio environments. http://e2r2.motlabs.com/dissemination/conferences/E2RII_18_EW_Paper.pdf. Mar. 2008.
- [7] Houze P, Jemaa S B, and Cordier P. Dynamic spectrum allocation algorithm for cognitive networks [C]. International Conference on Wireless and Mobile Communications.

- Guadeloupe, French Caribbean. Mar. 2007: 25-30.
- [8] Mitola J. Cognitive radio for flexible mobile multimedia communications [C]. Mobile Multimedia Communications. California, USA. Nov.1999: 3-10.
- [9] Obeldobel J, Ruse H, and Graf F. Statistical modelling of time variant processes for interference analysis in mobile radio network planning [C]. International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC). Taipei, Taiwan. Oct. 1996, Vol.3: 823-827.
- [10] Rubinstein A and Osborne M. Bargaining and Markets [M]. California: Academic Press, 1990: 29-49.
- [11] Jeffrey A. Mathematics for Engineers and Scientists [M]. Sixth Edition. London: CRC Press, 2005: 321-323.
- [12] 3GPP TS 05.05 V8.20.0. Radio transmission and reception (Release 1999) [S]. 2005.
- [13] 3GPP TS 25.104 V6.15.0. Base Station (BS) radio transmission and reception (FDD) (Release 6) [S]. 2007.
- [14] ETSI EN 300 744. Digital Video Broadcasting (DVB): Framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television [S]. 1997.
- [15] 3GPP TR 25.942 V7.0.0. Radio Frequency (RF) system scenarios (Release 7) [S]. 2007.
- 黎文边: 男, 1979 年生, 博士生, 研究方向为下一代通信系统的频谱管理和无线资源管理.
- 林粤伟: 男, 1979 年生, 博士生, 研究方向为 B3G 异构网络中的无线资源管理.
- 王小猛: 男, 1985 年生, 硕士生, 研究方向为下一代通信系统的频谱管理.
- 冯志勇: 女, 1971 年生, 副教授, 主要研究方向为宽带无线通信与个人通信.
- 张平: 男, 1959 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为 3G 和 B3G 无线通信理论和技术.